

분산형 전산환경 개발 및 이를 활용한 교량단면의 플러터 발생풍속 산정

Development of Distributed Computing Environment and Its Application to Evaluation of Flutter Onset Velocity of Bridge Deck Section

이근배¹⁾ · 김종암²⁾

Lee, Kuen-Bae · Kim, Chongam

Abstract : The purpose of this paper is the evaluation of the flutter velocity acting on a moving bridge deck section using so called the Distributed Computing Environment. The Distributed Computing Environment is a virtual organization supporting CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations for the users who have a lack of knowledge on CFD. The two-dimensional unsteady incompressible Navier-Stokes equations are used as the governing equations and moving mesh technique is used to model the movement of the bridge deck section to validate the research environment. Also, solution procedures for the flutter condition of structures that includes the computed unsteady aerodynamic forces are presented. The validation is examined by comparing the computed and experimentally evaluated flutter velocity.

Key words : Distributed Computing Environment, CFD (Computational Fluid Dynamics), Flutter velocity

요 약 : 본 논문에서는 진동중인 교량 단면에 작용하는 풍하중을 산정하고 그에 따른 플러터 발생풍속을 예측하기 위하여 분산형 전산환경을 활용한 수치해석 연구를 수행하였다. 분산형 전산환경은 웹 포털을 기반으로 수치해석 환경을 제공하는 일종의 수치풍동 시스템으로서, 전산유체역학 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 에 대한 전문지식이 부족한 사용자들도 격자생성, 수치해석자를 이용한 계산, 가시화 등의 전 과정을 편리하게 수행할 수 있는 차세대 토목 분야 계산 환경이다. 본 연구 환경의 검증을 위해 수치해석자에 적용된 지배방정식은 2차원 비정상 Navier-Stokes 방정식으로서, 교량의 움직임을 모사하기 위하여 동적격자 기법을 도입하였다. 또한 계산된 비정상공기력을 적용하여 플러터 발생풍속을 산정하였으며, 그 결과는 기존의 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

키워드 : 분산형 전산환경, 전산유체역학, 플러터 속도

1. 서 론

최근 들어 구조재의 재료적 특성 향상과 컴퓨터를 이용한 해석기술의 발달에 따라 교량설계 및 시공기술이 급격히 향상되어, 국내외에서 사장교 및 현수교와 같은 장대교량의 수요가 증대되고 있는 실정이다. 구조물이 장대화될수록 구조강성은 작아지고 이로 인해 고유진동 주기가 길게 되어 바람에 매우 민감하게 반응하고, 경우에 따라서는 큰 진동을 일으키게 되므로, 설계 시에 바람에 대한 구조물의 거동과 안정성을 면밀히 검토해야 한다. 장대교량의 단면 설계에 있어서 가장 문제가 되는 내풍 안정성을 검토하기 위한 설계

방법으로 축소 모형을 이용한 풍동실험을 통하여 직접적으로 안정성을 확인하거나, 풍동실험에서 도출한 계수들을 이론적인 모델에 적용하는 반 해석적 방법이 사용되어 왔다. 그러나 풍동실험의 경우 많은 비용과 시간이 소요되므로, 최근 컴퓨팅 자원과 해석기술의 발달과 더불어 전산유체역학을 활용한 내풍 안정성 평가가 크게 각광받고 있다.

정지상태의 구조물과는 달리 유체가 가하는 힘에 의해 진동하는 구조물에서는 구조물의 진동이 유체의 흐름에도 영향을 미치는 상호작용을 하게 된다. 이러한 분야를 공탄성학(aeroelasticity)라고 하며, 항공분야에서 항공기 날개의 설계를 위하여 오래 전부터 연구되어 왔다. 하지만 항공기 날개의 경우 유체의 박리가 발생하지 않는 유선형 구조물이므로 교량과 같이 각진 구조물의 공기역학적 거동과는 상당부분 다르게 나타난다. 각진 구조물의 경우 훨씬 더 복잡한 거동을 하게 되는데, 이와 같은 교량 주위 유동현상에 대한 연구

1) 학생회원, 서울대학교 협동과정 계산과학 전공, 박사과정
(kissing6482@snu.ac.kr)

2) 정회원, 교신저자, 서울대학교 기계항공공학부 교수, 공학박사
(chongam@snu.ac.kr)

는 1990년대 이후 본격적으로 시작되었다.

Nomura와 Hughes⁽¹⁾는 원형 실린더의 와류진동현상을 해석하기 위하여, 점성유체와 구조물의 상호작용 현상을 유한요소법을 적용하여 해석하였다. 또한 Larsen과 Walther⁽²⁾는 이산와도법 (Discrete Vortex Method)을 이용하여 구조물의 플러터 발생풍속을 예측하는 방법을 제안하였다. Larsen과 Walther는 수치해석을 통해 비정상 공기력을 계산하고, 이를 이용하여 Simu와 Scanlan⁽³⁾이 제시한 플러터 계수(flutter derivative)를 산정하여, 플러터 발생풍속을 계산하였다. 국내에서는 정운용과 권순덕⁽⁴⁾, 김대근과 김호경⁽⁵⁾ 등에 의해 CFD를 이용한 공탄성 해석 연구가 진행되어 왔다.

그러나 기존 연구의 경우, 난류를 고려하지 않은 이산와도법이나 유한요소법 기반의 수치기법들을 적용하였거나 상용 해석 툴을 사용하여 계산하였기 때문에, 실제 교량 거더 주위에서 발생하는 유동장과 비교하여 수렴해의 정확도가 높지 않았을 뿐만 아니라, 해석 시간을 효과적으로 단축시킬 수 있는 기법들이 적용되지 않았기 때문에, 실제 내풍단면 설계 시 풍동실험에 비해 사용빈도나 신뢰도가 높지 않았던 것이 사실이다. 또한 CFD에 익숙하지 않은 사용자들의 경우, 내풍 안정성을 검토하기위한 수치적 접근이 매우 제한적이었다.

본 연구에서는 CFD에 대한 전문 지식이나 경험이 부족한 사용자도 비교적 쉽게 사용할 수 있는 분산형 전산환경을 활용하여, 유한체적법(Finite Volume Method) 기반의 고차 정확도 수치기법을 적용한 비정상 공기력을 계산하고, 난류 천이영역인 교량 거더 주위에서 발생하는 비정상 유동 특성을 분석한다. 또한 플러터 해석을 위하여 비정상 공기력을 사용하여 플러터 계수를 계산하고, 이를 바탕으로 플러터 방정식을 구성한다. 최종적으로 플러터 방정식의 해를 구함으로써 구조물의 플러터 발생풍속을 예측하며, 검증은 위하여 수치적인 방법으로 구한 플러터 발생풍속과 기존의 실험 및 수치해석 결과를 비교한다.

2. 연구 방법

2.1 분산형 전산환경 개요

분산형 전산환경은 웹 포털을 기반으로 수치해석 환경을 제공하는 수치풍동 시스템으로서^(6,7), 사용자가 해석하고자 하는 대상을 모델링하고 격자계를 구성하는 격자 생성(mesh generation) 서비스, 수치해석자(CFD solver)를 이용한 계산 서비스, 계산 과정에서의 모니터링을 위한 모니터링 서비스, 계산 결과를 가시화하는 가시화 서비스로 구성되어 있다. 본 시스템은 포털 서비스를 통해 사용자에게 제공되며 그리드스피어(GridSphere)⁽⁸⁾를 바탕으로 구성되어 기본적으로 사용자 관리, 세션 관리, 그룹 관리, 레이아웃 관리 등을 제공

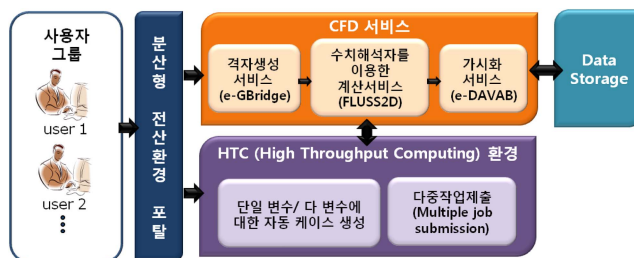


그림 1. 분산형 전산환경의 개략도

하며, 사용자가 포털을 통해서 다양한 서비스를 쉽게 사용할 수 있는 환경을 구축하게 도와준다.⁽⁹⁾

2.2 분산형 전산환경 시스템의 구현

일반적으로 수치해석은 전처리(Pre process), 계산(Computation), 후처리(Post process)의 세 단계로 이루어지며, 웹 포털은 이들 단계를 수행하기 위한 서비스를 제공한다(그림 1). 전산유체역학 분야에서 전처리 과정은 공간 격자계 생성 과정을 의미한다. 본 시스템에서는 사용자가 자동격자 생성 서비스를 통해 해석하고자 하는 대상의 기하학적인 형상과 관련 격자계를 직접 모델링 할 수 있다. 모델링한 격자계를 토대로 시스템에 내장된 고성능의 수치해석자(CFD Solver)를 이용하여 정밀한 수치해석을 수행하는데 그 과정에서 중간 결과와 계산 과정을 모니터링 할 수 있게 함으로써 수치해석에 대한 정보를 사용자가 실시간으로 제공받을 수 있다. 마지막으로 수치해석자의 계산 결과를 후처리 서비스를 통해 가시화 하게 된다. 본 연구에서는 HTC(High Throughput Computing) 환경을 활용하여, 교량 거더에서 발생하는 플러터 풍속을 산정하였다.

2.2.1 격자생성 서비스

격자 생성 서비스는 수치해석 과정의 첫 번째 단계인 전처리 과정을 서비스하는 것으로, 웹 포털을 통하여 제공되는 응용프로그램(e-GBridge)을 통하여 제공된다. 격자 생성 과정은 그림 2와 같이 크게 두 가지 단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 단계는 해석하고자하는 대상의 형상을 모델링하는 것이며, 두 번째 단계는 모델링한 데이터를 이용하여 격자계를 구성하는 것이다. 해석대상의 형상을 모델링할 때에는 간단한 형상의 경우 e-GBridge에서 기본적으로 제공하는 대표적인 단면 형상에 대한 모델링 기능을 이용하여 작업을 수행할 수 있다. 복잡한 임의의 형상에 대하여는 교량 도면(bmp 형식)을 업로드 하여 직접 모델링할 수 있는 기능을 제공한다.

2.2.2 수치해석 서비스

분산형 전산환경에서는 전산유체역학분야에서 사용되는

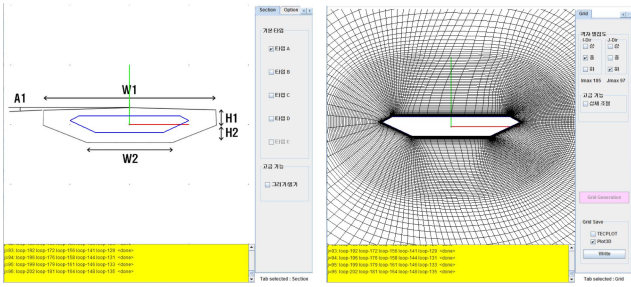


그림 2. e-GBridge를 활용한 격자생성

여러 가지 수치 기법들을 적용한 수치해석자(FLUSS2D)가 제공되며 자세한 내용은 다음 절에 설명하기로 한다. 본 시스템에서는 형상과 유동조건에 따라 Project와 Case를 설정하는 형태로 서비스를 제공하며, 격자생성 이후에 Project와 Case를 구성하게 된다.

2.2.3 모니터링 및 가시화 서비스

수치해석 서비스의 중간 수렴 정도를 보여주기 위해 모니터링 서비스가 제공된다. 사용자가 생성한 각 case별 작업 정보 및 자원 정보들에 대한 기본적 정보를 보여주며, 사용자가 특정 작업에 대한 작업 상태를 확인하고자 할 때는 residual history 그래프를 보여준다. 분산형 전산환경에서 산출된 결과파일은 그림 3과 같이 e-DAVAB 가시화 프로그램을 통해 도시화되어 나타나게 된다. 이와는 별도로 고급 사용자들을 위해 일반적으로 많이 사용되고 있는 Tecplot 포맷의 결과 파일을 다운로드 할 수 있도록 서비스하고 있다.

2.3 유체 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서는 2차원 비정상 비압축성 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식으로, 교량 거더의 연직과 회전방향의 2자유도 운동을 모사하기 위하여 동적격자 기법을 도입하였으며, 지배방정식은 다음과 같다. 여기서 윗첨자 (—)는 레이놀즈 평균값을 나타낸다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

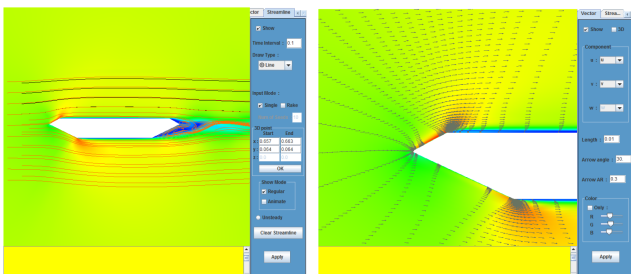


그림 3. e-DAVAB를 활용한 유동장 가시화

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla \bar{p} + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \bar{u} \quad (2)$$

여기서 속도성분은 $\bar{u} = \bar{u}_a + \bar{w}$ 로 구성되며 \bar{u}_a 는 대류속도, \bar{w} 는 교량 단면의 강제 진동 모델링을 위한 격자의 속도성분을 나타낸다. 비압축성 방정식은 속도장과 압력장이 연결되어 있지 않으므로 각 sub-iteration 마다 연속방정식을 만족시키는 pseudo compressibility 방법⁽¹⁰⁾을 적용하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \nabla \cdot \bar{u} \quad (3)$$

여기서 τ 는 pseudo-time, β 는 pseudo compressibility parameter를 나타낸다. 비정상유동장을 해석하기 위하여 이중시간 전진법(dual time stepping)을 사용하였으며 비점성항은 flux difference splitting 방법에 기초한 풍상차분법을, 점성항은 중앙 차분법을 적용하였다. 또한 MUSCL을 이용하여 비점성항은 3차 정확도, 점성항은 2차 정확도로 계산하였다. 시간 전진은 내재적 시간 적분법인 LU-SGS 방법⁽¹¹⁾을 사용하였다. 난류 유동장 해석을 위해서 k- ω SST 난류 모델을 사용하여 유동장 방정식과 결합하여 구하였으며, 난류 천이 과정에서의 유동을 모사하기 위하여 Total stress limitation (TSL)을 사용하였다. Zheng와 Liu⁽¹²⁾ 또한 비정상 유동 해석에서 발생하는 컴퓨팅 로드를 완화시키기 위해 MPI 프로 그래밍을 이용한 병렬해석기법을 적용하였고, 수렴가속화를 위해 Multi-grid 기법을 적용하였다. 적용된 수치해법의 자세한 내용은 참고문헌⁽¹³⁾에 잘 나와 있다.

2.4 비정상 공기력의 추출 및 플러터 해석

구조물에 연직 및 회전방향으로 각각 강제조화진동을 가하면서 구조물에 작용하는 양력과 피칭모멘트를 적용하면 다음과 같이 플러터계수를 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_1^* &= \frac{L_h \sin \theta_{Lh}}{\frac{1}{2} \rho B^2 \omega_h^2 h_0}, & H_2^* &= \frac{L_\alpha \sin \theta_{L\alpha}}{\frac{1}{2} \rho B^3 \omega_\alpha^2 \alpha_0}, \\ H_3^* &= \frac{L_\alpha \cos \theta_{L\alpha}}{\frac{1}{2} \rho B^3 \omega_\alpha^2 \alpha_0}, & H_4^* &= \frac{L_h \cos \theta_{Lh}}{\frac{1}{2} \rho B^2 \omega_h^2 h_0}, \\ A_1^* &= \frac{M_h \sin \theta_{Mh}}{\frac{1}{2} \rho B^3 \omega_h^2 h_0}, & A_2^* &= \frac{M_\alpha \sin \theta_{M\alpha}}{\frac{1}{2} \rho B^4 \omega_\alpha^2 \alpha_0}, \\ A_3^* &= \frac{M_\alpha \cos \theta_{M\alpha}}{\frac{1}{2} \rho B^4 \omega_\alpha^2 \alpha_0}, & A_4^* &= \frac{M_h \cos \theta_{Mh}}{\frac{1}{2} \rho B^3 \omega_h^2 h_0} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 h_0 와 α_0 는 각각 연직 및 회전방향의 진폭이며, ω_h 와 ω_α 는 각각 연직 및 회전방향의 진동수이며, L_h 와 M_h 는 연

직강제진동 중인 구조물에 작용하는 양력과 피칭모멘트의 진폭, θ_{Lh} 와 θ_{Mh} 는 각각 연직변위와 양력 및 피칭모멘트의 위상차이며, B 는 구조물의 특성길이이다. L_α 와 M_α 는 회전 강제진동 중인 구조물에 작용하는 양력과 피칭모멘트의 진폭, $\theta_{L\alpha}$ 와 $\theta_{M\alpha}$ 는 각각 회전변위와 양력 및 피칭모멘트의 위상차이다.

한편 교량 거더에 작용하는 비정상 공기력을 표현하기 위하여 Scanlan⁽³⁾의 정의를 따를 때, 양력과 피칭모멘트는 다음과 같이 새롭게 정의된다.

$$L^{se} = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[kH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + kH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + k^2 H_3^* \alpha + k^2 H_4^* \frac{h}{U} \right] \quad (5)$$

$$M^{se} = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[kA_1^* \frac{\dot{A}}{U} + kA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + k^2 A_3^* \alpha + k^2 A_4^* \frac{h}{U} \right] \quad (6)$$

여기서 ω 는 강제진동하는 교량의 진동수이고, $k(=B\omega/U)$ 는 reduced frequency이다.

교량의 변위를 조화함수 $h=h_0 e^{i\omega t}$, $\alpha=\alpha_0 e^{i\omega t}$ 로 각각 가정하고, 식 (4)의 플러터 계수와 식 (5), (6)의 비정상 공기력을 사용하여 교량 거더의 2자유도 운동방정식을 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \left[-\omega^2 \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_h^2 m & 0 \\ 0 & \omega_\alpha^2 I_m \end{bmatrix} \right] \begin{pmatrix} h_0 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} e^{i\omega t} \\ &= \frac{1}{2}\rho B^2 \omega^2 \begin{bmatrix} (H_4^* + iH_1^*) & B(H_3^* + iH_2^*) \\ B(A_4^* + iA_1^*) & B^2(A_3^* + iA_2^*) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h_0 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 전형적인 고유치문제이며, 허수부를 포함하고 있으므로 복소 고유치문제가 된다. 식 (7)을 풀어 얻게 되는 고유치를 이용하여, 아래와 같이 교량의 최종적인 진동수와 감쇠비를 계산한다.

$$f = \frac{|\lambda|}{2\pi}, \quad \xi = \frac{Im(\lambda)}{|\lambda|} \quad (8)$$

여기서 f 는 진동수를 ξ 는 감쇠비를 나타낸다. 플러터는 동적 불안정현상이므로 식 (8)의 감쇠비가 음의 값을 가질 때 발생한다. 따라서 감쇠비의 부호가 바뀌는 풍속이 플러터 발생풍속이 된다.

3. 해석 결과

본 연구에서 적용한 수치기법의 검증을 위하여 기존의 실험 및 수치해석 결과⁽⁴⁾와 비교하였다. 검증에 사용된 교량 단면은 직사각형으로 모델의 자세한 제원은 표 1과 같다. 이때 강제진동의 진폭은 연직방향과 회전방향에 대하여 각각

표 1. 직사각형 해석모델 제원

section	width/depth	width (mm)	depth (mm)	mass (kg/m)
R1	20	200	10	4.31012
R2	10	200	20	4.53575
section	mass moment of inertia (kgm ² /m)	frequency (Hz)		
		vertical	torsional	
R1	0.042807	2.8510	2.8983	
R2	0.042193	2.7216	2.8603	

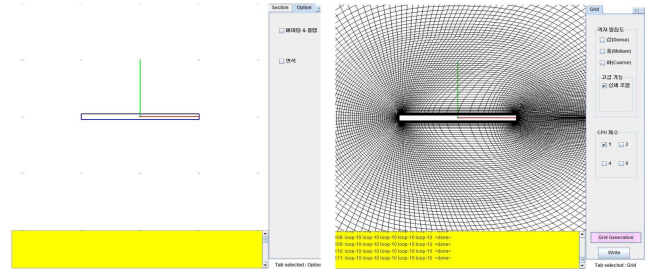


그림 4. 직사각형 단면 격자(R1 단면)

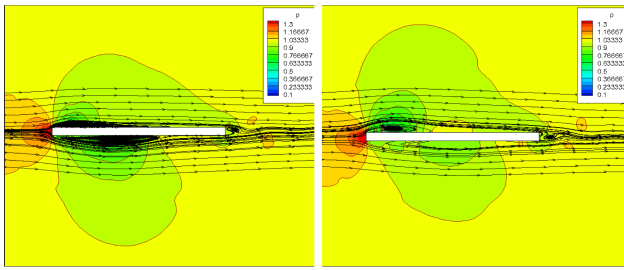
5mm와 0.05rad이고, 가진 진동수는 2Hz이다.

해석격자는 O-type으로 그림 4와 같이 분산형 전산환경에 내장된 자동격자생성기(e-GBridge)로 제작하였으며, 격자의 개수는 233×129개가 사용되었다. 해석은 무차원 유속(U/fB)이 22.5가 될 때까지 유속을 증가시키면서 수행하였으며, 이때 레이놀즈수는 평판의 폭을 특성 길이로 할 때 약 10,000-123,000 정도이다.

그림 5와 6은 연직방향으로 1주기의 강제진동 중인 R1, R2 단면 주위에서의 압력장과 유선을 나타낸다. 그림의 압력장과 유선의 분포를 통해 직사각형 단면의 앞전에서 큰 와류가 느린 주기로 발생하다가 떨어져나가는 것을 볼 수 있으며, 뒷전에서 작은 와류가 상대적으로 빠른 주기로 떨어져나가는 것을 확인할 수 있다.

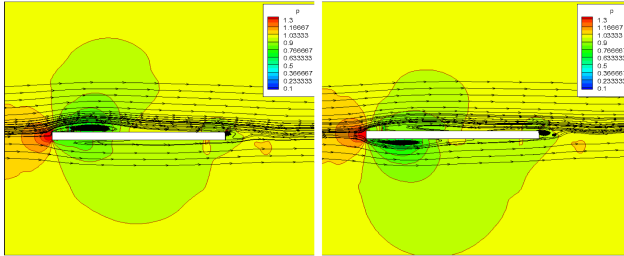
그림 7과 8은 무차원 시간에 따른 공력계수 그래프이다. 그림 5, 6과 비교해볼 때 앞전에서 천천히 떨어져 나가는 큰 와류는 그래프의 큰 진폭에 영향을 주고, 뒷전에서 빠르게 떨어져 나가는 작은 와류는 중첩되어 나타나는 작은 진폭에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 수치해석 결과⁽⁴⁾와는 다른 양상이며, 본 연구의 결과가 보다 정밀한 유동 특성을 관찰할 수 있음을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 단면이 일정한 진폭과 주기로 운동할 때, 발생하는 공기력도 진폭만 다를 뿐 일정한 주기를 가지고 진동하고 있는 것을 확인할 수 있다.

플러터 계수는 계산된 공기력으로부터 식 (4)를 이용해 추출하게 된다. 먼저 특정 풍속일 때 연직방향으로 강제가진 시 공기력의 진폭을 구하고, 공기력과 가진 변위와의 위상차



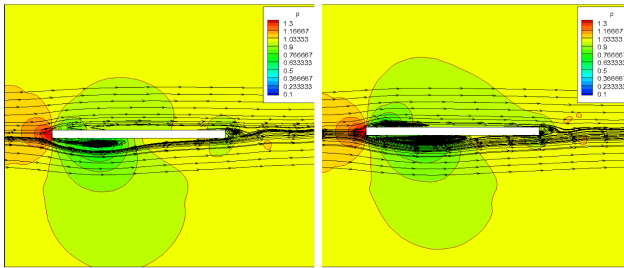
(a) $t = 72.000$

(b) $t = 73.760$



(c) $t = 75.440$

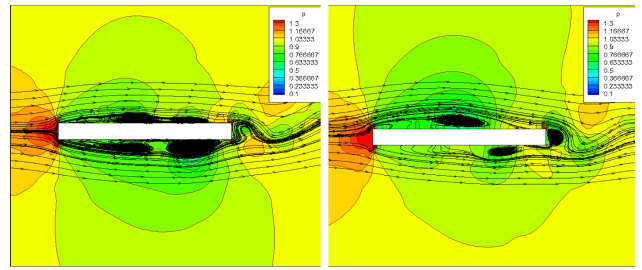
(e) $t = 77.040$



(d) $t = 78.719$

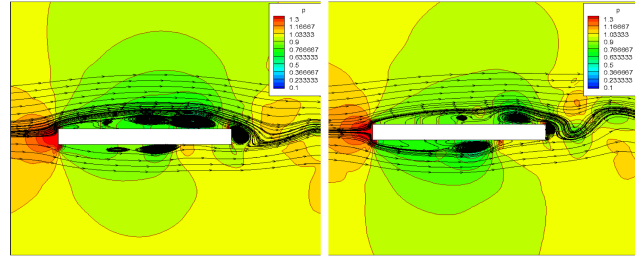
(e) $t = 79.919$

그림 5. R1 단면 주위 압력장 및 유선(연직방향진동, $U/FB=8$)



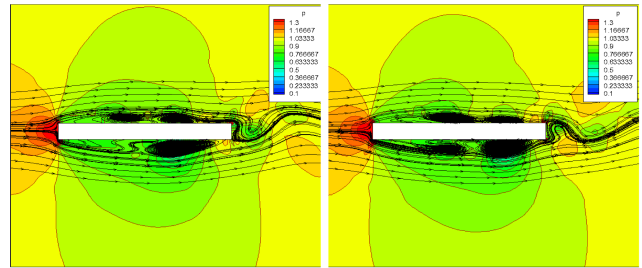
(a) $t = 62.999$

(b) $t = 64.609$



(c) $t = 66.289$

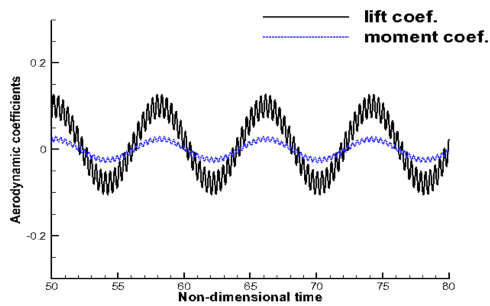
(e) $t = 67.969$



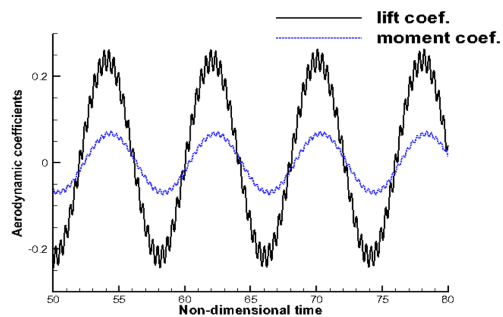
(d) $t = 69.649$

(e) $t = 70.929$

그림 6. R2 단면 주위 압력장 및 유선 (연직방향진동, $U/FB=7$)

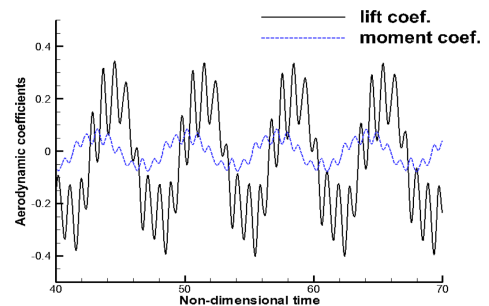


(a) 연직방향 진동, $U/FB=8$

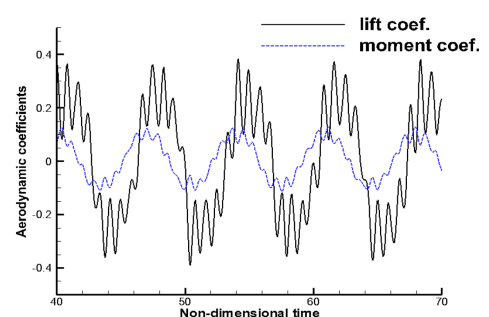


(b) 회전방향 진동, $U/FB=8$

그림 7. R1 단면의 무차원 시간에 따른 양력 및 피칭모멘트 계수



(a) 연직방향 진동, $U/FB=7$



(b) 회전방향 진동, $U/FB=7$

그림 8. R2 단면의 무차원 시간에 따른 양력 및 피칭모멘트 계수

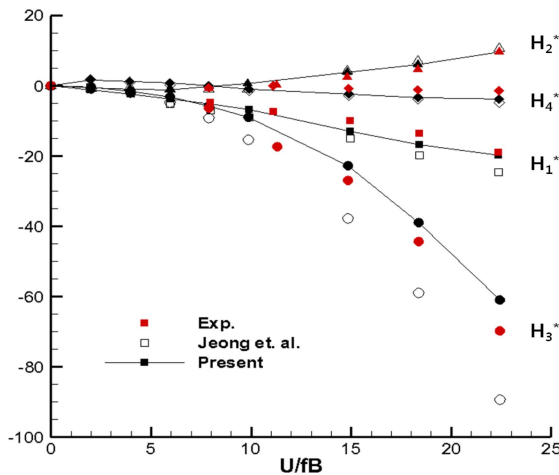
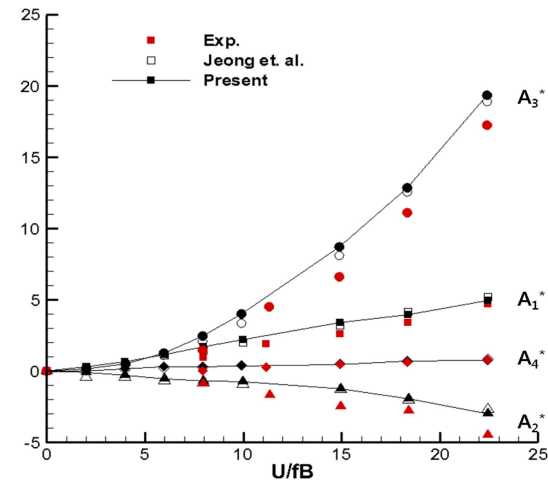


그림 9. 단면 R1의 플러터계수

그림 10. 단면 R2의 플러터계수

를 구한다. 그러나 공기력 그래프의 경우, 앞전과 뒷전에서 떨어져 나가는 와류의 크기와 주기가 다르기 때문에 그래프가 중첩된 형태로 나타나서 진폭과 위상차를 구하는 것이 어렵다. 따라서 FFT(Fast Fourier Transform) 필터링을 적용하여 단면 주위의 지배적인 유동특성을 나타내는 큰 진폭을 갖는 그래프를 추출하여, 진폭과 가진 변위와의 위상차를 구한다. 이를 식 (4)에 대입하면 플러터 계수를 구할 수 있다. 회전방향 강제가진 시에도 동일한 방법으로 플러터 계수를 구한다.

그림 9와 10은 본 연구의 결과와 기존의 실험 및 수치해석 결과를 비교하고 있다. 그림을 통해서 플러터계수가 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

앞서 계산한 플러터 계수와 표 1에 나타난 물성치를 적용하여 R1과 R2 단면의 2자유도 플러터 해석을 수행하였다. 그 결과는 그림 11, 12와 표 2에 나타내었다. 그림 11과 12를 통해 풍속이 증가함에 따라 구조물과 바람의 연성작용에 의해 구조물의 진동수가 변하게 되는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 플러터 발생풍속의 비교

section	flutter onset velocity (m/s)		
	present	Jeong <i>et al.</i>	wind tunnel test (Mastumoto, 1996)
R1	3.88	3.90	3.91
R2	3.38	3.37	3.40

더불어 구조물의 감쇠비도 바뀌게 되는데, 감쇠비의 부호가 음의 값이 되는 순간에 플러터가 발생한다. 표 2에서 본 연구의 결과와 기존의 결과들을 비교하였다. 단면 R1에서 본 연구 결과로 구한 플러터 발생풍속은 3.88m/s이고 풍동 실험 결과⁽¹⁴⁾는 3.91m/s, 기존 수치해석 결과⁽⁴⁾는 3.90m/s로 서로 거의 일치하고 있다. 또한 단면 R2의 결과 역시 세 결과가 거의 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 수치방법으로 교량단면 주위의 유동 특성을 정밀하게 분석할 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 플러터 발생 풍속을 상당히 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

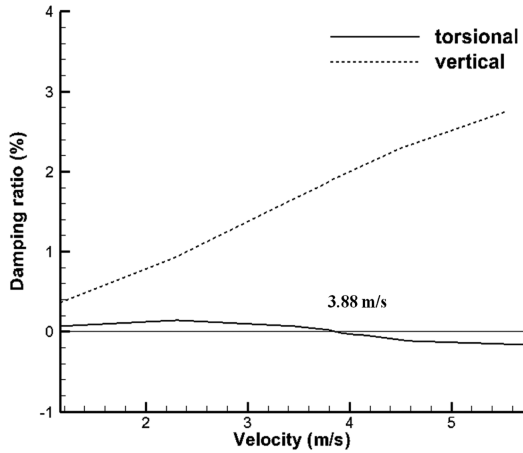


그림 11. R1 단면의 풍속에 따른 감쇠비와 진동수

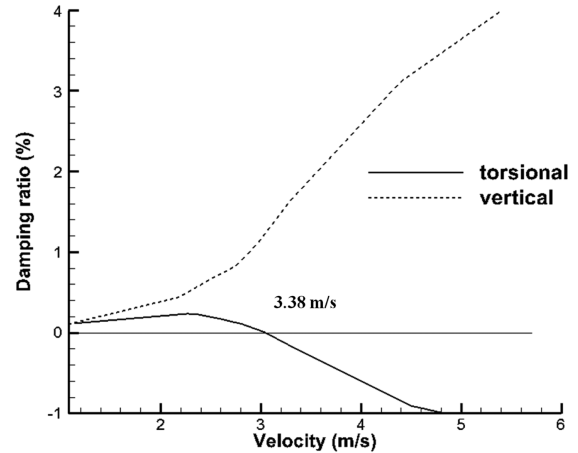
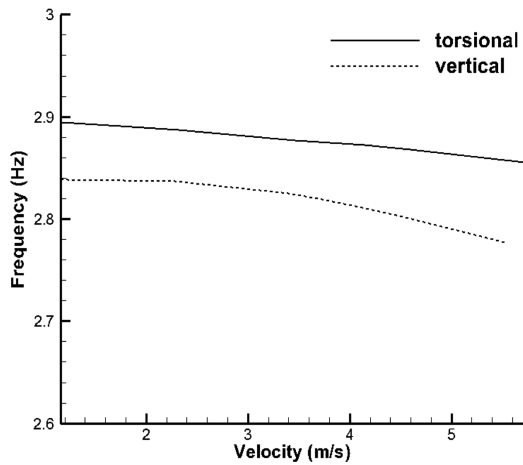
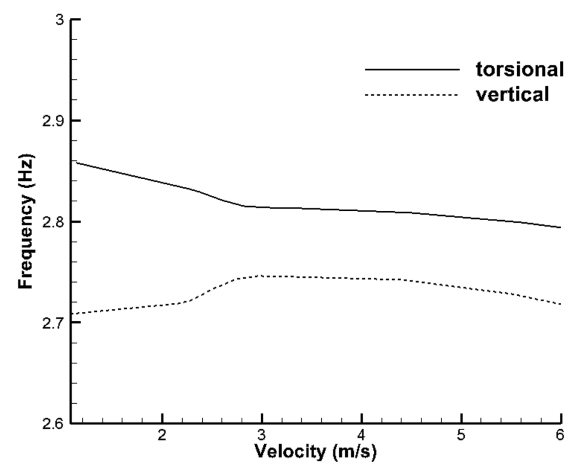


그림 12. R2 단면의 풍속에 따른 감쇠비와 진동수



4. 결 론

본 연구에서는 분산형 전산환경을 활용하여 구조물의 플러터 발생풍속을 수치적인 방법으로 계산하였다. 이를 위하여 2차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 강제진동 하에 있는 구조물 주위의 유동장을 해석하였고, 이를 통해 얻은 양력과 피칭모멘트를 사용하여 2자유도 플러터 방정식을 유도하고 이에 대한 해를 구하였다. 본 연구의 해석 결과와 기존의 실험 및 수치해석 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 연구에서 제시된 유체해석 모듈은 이산화도법과 유한요소법에 기초한 기존의 방법에 비하여 보다 정밀한 결과를 보여주었다. 또한 플러터 계수와 플러터 발생풍속은 기존의 결과들과 거의 일치하여 본 연구에서 제시한 방법이 타당함을 알 수 있었다. 특히, 전산 유체역학에 전문적 지식이 없는 일반 사용자들도 분산형 전산환경의 HTC 환경을 활용하여 다양한 케이스에 대한 해석을 효율적으로 수행할 수 있기 때문에, 본 연구의 방법이 향후 구조물의 플러터 발생풍속을 예측하는 효과적인 수단 중

하나로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량 사업(08기술혁신E01)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 또한 국토해양부 건설기술혁신사업(09기술혁신E02)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Nomura, T. and Hughes, T.J.R., "An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body," Comput. Method Appl. M., Vol. 95, pp. 115-138, 1992.
2. Larsen, A. and Walthe, J.H., "Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulations," J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., Vol. 67 & 68, pp. 253-265, 1997.

3. Simiu, E. and Scanlan, R.H., "Wind effects on structures - 3rd edition", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
4. 정운용, 권순덕, "전산유체역학을 이용한 교량 플러터 발생 풍속의 예측," 대한토목학회지, 제21권, 제2-A호, pp. 245-254, 2001.
5. 김대근, 김호경, 이상훈, "방호울타리 설치에 따른 교량단면의 공기역학 특성 해석 - 목포대교," 한국풍공학회지, 제 12 권, 제3호, p.201-209, 2008.
6. Ko, S-H, Han, S., Kim, J-H, Moon, J. B., Kim, C., Cho, K. W., Kim, Y., "Integrated rocket simulation of internal and external flow dynamics on the e-Science environment," J. Korean Phy. Soc., Vol. 55, No. 5, pp. 2166-2171, 2009.
7. Kim, J-H, Kim, C., "Numerical investigation on the geometric factors of insects' wing motion using e-Science environment," J. Korean Phy. Soc., Vol. 55, No. 5, pp. 2172-2179, 2009.
8. Novotny, J., Russell, M., Wehrens, O., "GridSphere: a portal framework for building collaborations." Concurrency - Practice and Experience, Vol. 16, pp. 503-513, 2004.
9. 김진호, 이준석, 고순흠, 안재완, 김종암, 김윤희, 조금원, "e-AIRS: e-Science 인프라 기반의 항공우주 공력통합 연구환경 구축," 한국항공우주학회지, Vol. 36, No. 5, pp. 438-447, 2008.
10. Rogers, S. E., and Kwak, D., "Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations," AIAA J., Vol. 28, No. 2, pp. 253-262, 1990.
11. Yoon, S. and Kwak, D., "Three-dimensional incompressible Navier-Stokes solver using Lower-Upper symmetric- Gauss-Seidel algorithm," AIAA J., Vol. 29, No. 6, pp. 874-875, 1991.
12. Zheng, X., Liu, F., "Staggered upwind method for solving Navier-Stokes and k- ω turbulence model equations", AIAA J., Vol. 33, No. 6, pp. 991-998, 1995.
13. Kim, C. S., Kim, C., Rho, O. H., "Parallel computations of high-lift airfoil flows using two-equation turbulence models", AIAA J., Vol. 38, No. 8, pp. 1360-1368, 2000.
14. Matsumoto, M., Kobayashi, Y. and Shirato, H., "The influence of aerodynamic derivatives on flutter, J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., Vol. 60, pp. 227-239, 1996.